ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT







УДК 519.654
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-161-168

Научная статья



Применение автокорреляционной инфракраснойтермографии для выявления дефектов в элементах металлических пролетных строений

А. Л. Соловьев[1] ✉, **М. Э. Рояк**[2]
[1]Сибирский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
[2]Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20
✉Alsolovyov1337@gmail.com

Аннотация
Введение. Зарождающиеся усталостные повреждения в металлических пролетных строениях мостов создают определенные угрозы безопасности эксплуатации. Для их своевременного выявления и диагностики используются различные методы неразрушающего контроля. Современным и популярным решением на данный момент является метод инфракрасной (ИК) термографии. В силу особенности работы ИК-камер для получения точного результата требуется дополнительная обработка записей, полученных с этих камер. Цель данной работы — представить метод обработки термофильмов и показать возможности его применения в реальных условиях.

Материалы и методы. Приводится описание способа обработки термографических фильмов, позволяющего выявить температурные аномалии, используя только информацию с камеры. Приведены результаты его применения на элементах действующих металлических пролетных строений мостов.

Результаты исследования. Показано, что для существующих дефектов имеются температурные аномалии. Это означает, что дефекты продолжают развиваться, что подтвердилось последующими наблюдениями за их состоянием. Кроме этого был выявлен случай температурной аномалии в бездефектной внешней области. Это может быть признаком зарождающегося дефекта, который не мог быть продиагностирован другими методами. Если наличие этого дефекта будет подтверждено при повторных обследованиях, то представится возможность диагностирования скрытых дефектов, которые еще не вышли на поверхность, и/или обнаружения потенциально разрушающихся мест.

Обсуждение и заключения. Показана эффективность ИК-термографии как метода бесконтактного неразрушающего контроля, а также его работоспособность на реальных объектах, находящихся под случайной нагрузкой.

Ключевые слова: ИК-термография, неразрушающий контроль, усталостные трещины, металлические мосты, дефектность конструкций, ИК-камера.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования: Соловьев, А. Л. Применение автокорреляционной инфракрасной термографии для выявления дефектов в элементах металлических пролетных строений / А. Л. Соловьев, М. Э. Рояк // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 2. — С. 161–168. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-161-168

Original article

Self-reference Lock-in Thermography for Detecting Defects in Metal Bridge Spans

Alexander L. Solovyev [1] ✉, **Mikhail E. Royak** [2]
[1] Siberian Transport University, 191, D. Kovalchuk St., Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marksa, Novosibirsk, Russian Federation
✉ Alsolovyov1337@gmail.com

Abstract
Introduction. Incipient fatigue damage in the metal superstructures of bridges creates certain threats to the safety of operation. Various methods of non-destructive testing are used for their timely detection and diagnosis. A modern and popular on-the-day solution is the method of infrared (IR) thermography. Due to the specifics of the operation of IR cameras, additional processing of recordings received from these cameras is required to obtain an accurate result. This work aims at presenting a method for processing thermofilms and describing the possibilities of its application under real conditions.
Materials and Methods. A method for processing thermographic films was described. It provided detecting temperature anomalies using only information from the camera. The results of its application on the elements of existing metal bridge spans are presented.
Results. It is shown that there are temperature anomalies for existing defects. This means that the defects continue to develop, which was confirmed by subsequent observations of their condition. In addition, a case of temperature anomaly in the defect-free external region was identified. This might be a sign of an incipient defect that could not be diagnosed by other methods. If the presence of this defect is confirmed during repeated examinations, it will be possible to diagnose hidden defects that have not yet come to the surface, and/or detect potentially collapsing places.
Discussion and Conclusions. The IR thermography performance as a method of non-contact non-destructive testing is shown, as well as its operability on real objects under random load.

Keywords: IR thermography, nondestructive testing, fatigue cracks, metal bridges, structural defects, IR camera.

Funding information: The authors would like to thank the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions for their improvement contributed significantly to the quality of this article.

For citation: A. L. Solovyev, M. E. Royak. Self-reference Lock-in Thermography for Detecting Defects in Metal Bridge Spans. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 161–168. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-161-168

Введение. Усталостные трещины в металлических конструкциях мостов, образующиеся под воздействием нагрузки от транспорта, ветровой нагрузки и т. п., представляют серьёзную проблему. Хотя эти трещины сами по себе влияют только на долговечность сооружения, при определенных условиях они могут дать толчок развитию хрупких трещин, что уже непосредственно влияет на безопасность использования конструкций [1].

Одним из современных методов неразрушающего контроля, набирающего популярность, является ИК-термография [2–12]. Принцип метода основывается на том факте, что любое тело, испытывающее механическое воздействие, выделяет количество тепла, пропорциональное интенсивности воздействия. Поэтому, при обследовании участка конструкции, содержащего дефекты, можно сразу же получить информацию о распределении напряжений по этому участку. Отличающееся температурное распределение будет являться индикатором протекающего усталостного повреждения [13, 14].

Основной сложностью при работе с ИК-камерами (тепловизорами) является получение результатов с приемлемой точностью. В силу особенностей строения детекторов наибольшая точность достигается при использовании камер с охлаждаемыми матрицами. Однако слишком высокая стоимость подобных аппаратов является серьёзным препятствием для их использования. Появление камер, использующих неохлаждаемые массивы микроболометров, улучшило ситуацию, поскольку эти камеры оказались заметно дешевле. Недостатком таких тепловизоров стала меньшая точность по сравнению с камерами с

охлаждаемыми матрицами. Поэтому для получения устойчивых результатов требуется дополнительная обработка получаемых термограмм.

В данной работе приводится алгоритм корреляционной ИК-термографии с применением сигнала, полученного непосредственно с тепловизионной съемки[1], а также некоторые результаты его применения.

Материалы и методы. Метод ИК-термографии основан на анализе распределения температуры в материале. При воздействии растягивающих или сжимающих напряжений на материал его температура будет изменяться пропорционально величине этих напряжений в соответствии со следующей формулой:[2]

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} T \cdot \Delta\sigma, \tag{1}$$

где α — коэффициент теплового расширения; ρ — плотность вещества; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; T — абсолютная температура, К; Δσ — изменение главных напряжений, МПа.

При сохранении адиабатических условий, а также при развитии только упругих деформаций связь (1) является линейной и обратимой, при которой изменение температуры следует за изменением напряжения. Как только в материале начинают зарождаться повреждения, он перестает быть упругим и развивает пластические деформации. Энергия системы, подверженной таким деформациям, интенсивно переходит в тепловую, привнося таким образом основной вклад в тепловой эффект. Таким образом, тепловая картина становится отражением внутреннего состояния материала (степени разрушения) и, следовательно, показателем уровня напряжений.

Определить относительную амплитуду ИК-сигнала можно с помощью метода наименьших квадратов[3]. Положим, что на конструкцию действует нагрузка F, воздействие которой в некоторой области можем измерить и обозначим как $f(t)$. Будем считать этот сигнал опорным. Пусть также имеется ИК-видеосъемка этой конструкции в тот же промежуток времени, которую можно представить как последовательность кадров (кадр — матрица значений размером $M \times K$) во времени и обозначим $y_{ij}(t)$ значения (i, j) элемента этой матрицы (пикселя) в момент времени t, где $1 \le i \le M$, $1 \le j \le K$.

Обозначим приближающую функцию для этого элемента как:

$$Y_{ij}(t) = a_{ij} + b_{ij} f(t), \tag{2}$$

где a_{ij} — смещение; b_{ij} — коэффициент влияния опорного сигнала f.

Будем приближать с помощью функции (2) сигналы $y_{ij}(t)$ из тепловизионного фильма. Покажем, как найти эти коэффициенты для некоторого $y_{ij}(t)$, для остальных — рассуждения будут аналогичны. Будем минимизировать отклонение нашего приближения от сигнала, полученного с камеры:

$$\Delta^2 = \sum_{n=1}^{N} \left(y_{ij}(n) - Y_{ij}(n) \right)^2 \to \min, \tag{3}$$

где N — количество кадров в записи; n — номер кадра, соответствующий времени. Отсюда b_{ij} может быть найдено следующим образом:

$$b_{ij} = \frac{\begin{vmatrix} N & \sum_{n=1}^{N} y_{ij}(n) \\ \sum_{n=1}^{N} f(n) & \sum_{n=1}^{N} y_{ij}(n) f(n) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum_{n=1}^{N} f(n) \\ \sum_{n=1}^{N} f(n) & \sum_{n=1}^{N} f^2(n) \end{vmatrix}} = \frac{N \sum_{n=1}^{N} y_{ij}(n) f(n) - \sum_{n=1}^{N} f(n) \sum_{n=1}^{N} y_{ij}(n)}{N \sum_{n=1}^{N} f^2(n) - \left(\sum_{n=1}^{N} f(n) \right)^2}. \tag{4}$$

[1] Sakagami T, Nishimura T, Kubo S, et al. Development of a Self-reference Lock-in Thermography for Remote Nondestructive Testing of Fatigue Crack (1st Report, Fundamental Study Using Welded Steel Samples). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series A. 2006;72:1860-1867. https://doi.org/10.1299/kikaia.72.1860

[2] Thomson W. (Lord Kelvin). On the dynamical theory of heat. Trans. R. Soc. Edinburgh. 1853;20:261-283.

[3] Lesniak JR, Boyce BR, Howenwater G. Thermoelastic Measurement Under Random Loading. In: Proc. SEM Spring Conf., 1998. P. 504-507.

Повторяя (3) и (4) для всех (*i*, *j*) получим матрицу $B = \{b_{ij}\}$ того же размера, что и исходный кадр съемки. Таким образом получим приближение каждого сигнала $y_{ij}(t)$ ИК-съемки по времени посредством опорного сигнала $f(t)$. Значения матрицы B показывают относительную интенсивность изменения температуры в некоторой области по сравнению с интенсивностью изменения опорного сигнала. Опорный сигнал $f(t)$ не обязательно может быть получен со сторонней системы, например, с тензодатчика. Описанный подход, именуемый автокорреляционной ИК-термографией, может быть применен и с опорным сигналом, полученным с той же самой ИК-записи[4] [15, 16].

Результаты исследования. Реализация предложенного алгоритма была выполнена в виде Python скриптов. С помощью этих скриптов производилась обработка термографических фильмов, записанных на металлических пролетных строениях действующих автомобильных мостов, в конструкциях которых были ранее диагностированы усталостные трещины. Проверка работоспособности алгоритма была проведена на стендовых испытаниях, имитирующих поведение реальных конструкций с известной информацией о дефекте. Съемка проводилась с помощью инфракрасной камеры с неохлаждаемым микроболометром Fluke Ti400, имеющей тепловую чувствительность менее 0,05 °C и частоту съёмки 9 Гц. Записи сделаны в момент воздействия автомобильной нагрузки на мост. В качестве опорных сигналов для каждой записи использовалась бездефектная зона размером 15×15 пикселей с того же конструктивного элемента недалеко от существующей и/или предполагаемой зоны разрушения. Результаты обработки наглядно представлены в виде изображений, полученных посредством значений матрицы *B*. Каждому значению матрицы соответствует один пиксель на изображении, преобразование числа в цвет осуществляется с помощью функции палитры из определенных в пакете matplotlib.

На рис. 1 изображен фрагмент стальной балки пролетного строения. В месте соединения горизонтального листа со стенкой обнаружена трещина (рис. 1 *в*). На рис. 1 а показан один из кадров ИК-фильма этой трещины. На рис. 1 *б* представлен результат обработки, на котором отчетливо видно пятно, свидетельствующее о разогреве, происходящем в обозначенной зоне. Эта зона соответствует области вокруг вершины трещины, что свидетельствует о продолжающемся развитии дефекта. Это же было подтверждено повторными обследованиями, которые установили увеличение трещины на более чем 30 % за 4 года.

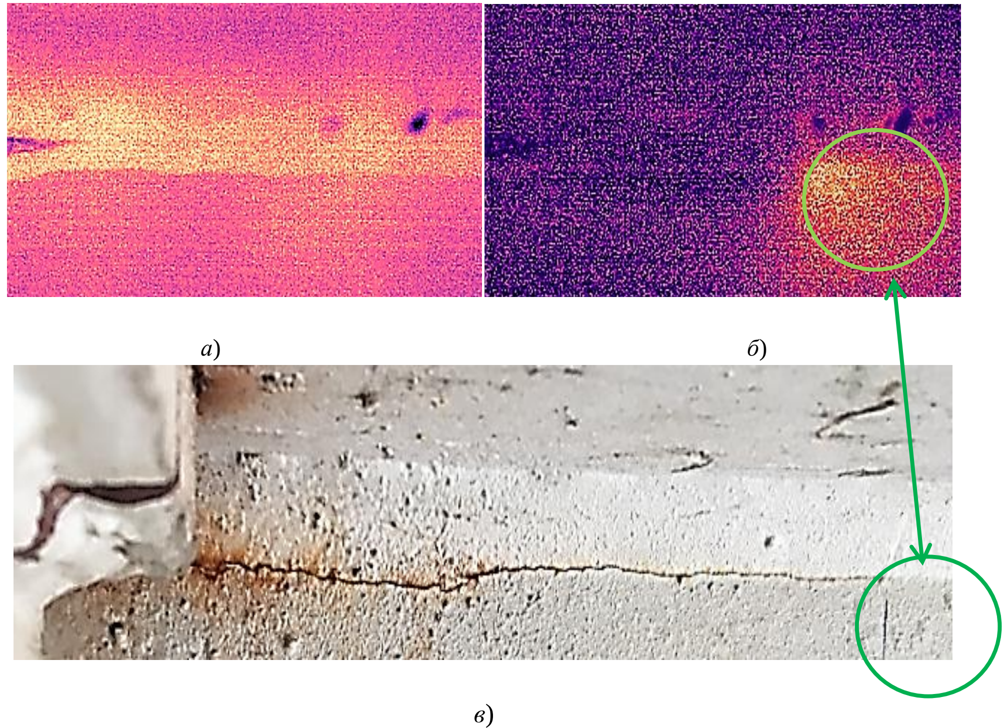
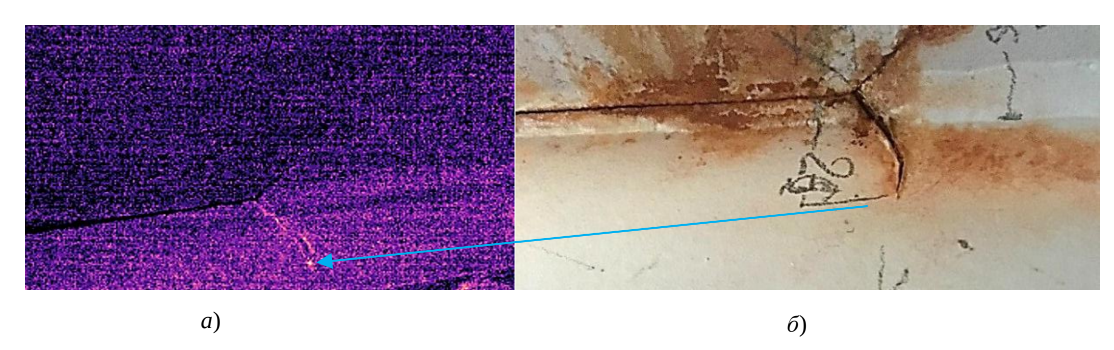


Рис. 1. Результаты инфракрасной съёмки:
а — кадр фильма; *б* — изображение, построенное по значениям матрицы *B*; *в* — фотография трещины

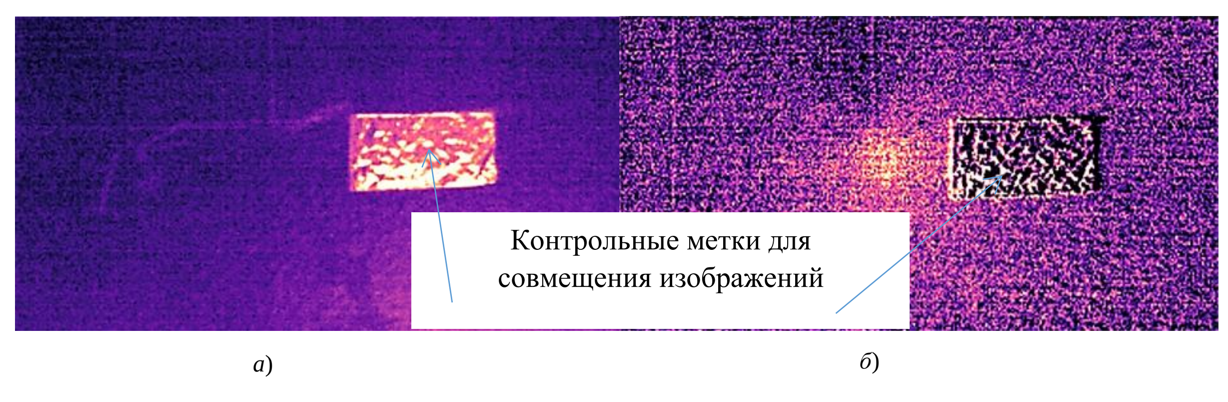
[4] Galietti U, Modugno D, Spagnolo L. A novel signal processing method for TSA applications Measurement Science and Technology. 2005;16:2251. 10.1088/0957-0233/16/11/017

На рис. 2, 3 изображены трещины, зародившиеся в сварном шве, затем раздваивающиеся и уходящие в ребро жесткости и лист настила. Съемка проводилась во время испытаний моста. Для контроля напряжений в этих же местах были установлены тензометрические датчики, результаты с которых подтвердили развитие этих трещин.

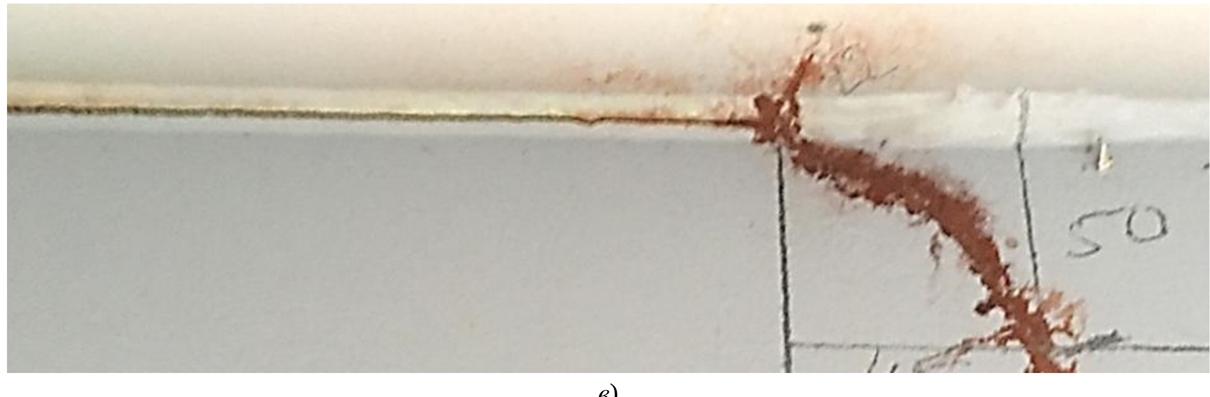


а) *б*)

Рис. 2. Диагностированная усталостная трещина:
а — изображение, построенное по значениям матрицы *B*; *б* — фотография



а) *б*)



в)

Рис. 3. Диагностированная усталостная трещина:
а — кадр фильма; *б* — изображение, построенное по значениям матрицы *B*; *в* — фотография трещины

На рис. 4 изображены совмещенные показания тензодатчиков и температуры для одного и того же участка конструкции. Температурные показатели были получены усреднением в области обследования и последующим сглаживанием по времени. Тензометрические данные также были сглажены. Как видно, что изменение температуры полностью повторяет изменение напряжений с точностью до чувствительности прибора.

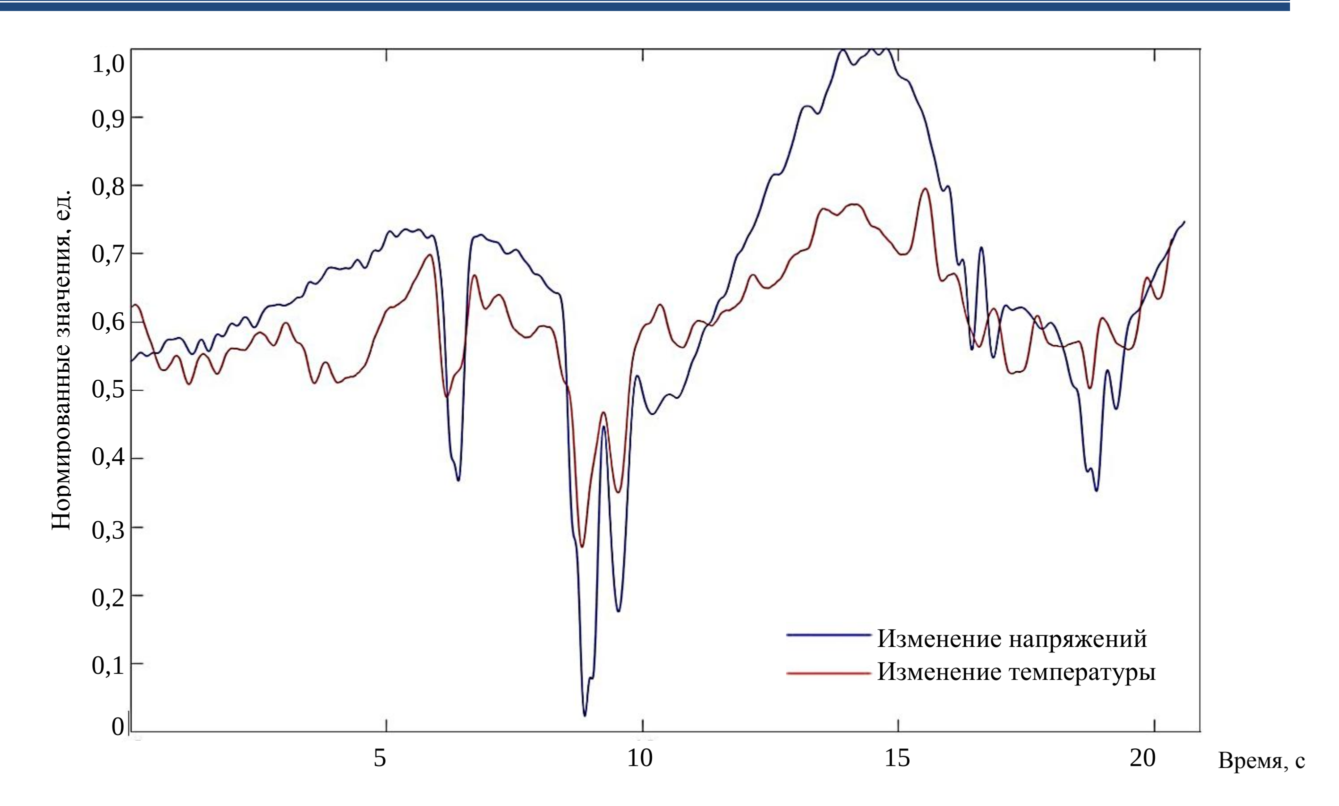
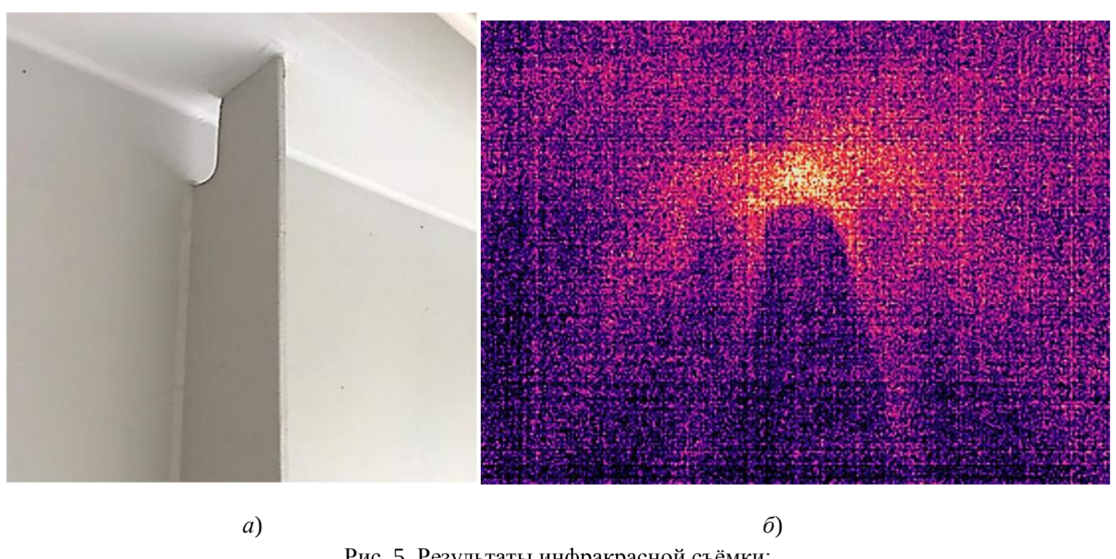


Рис. 4. Графики изменения напряжений, совмещенные с изменениями температуры (изменения температуры приняты с обратным знаком). Величины по оси ординат нормированы относительно единицы

На рис. 5 изображен элемент конструкции, не имеющий видимых повреждений, которые также не были однозначно определены другими методами. Однако, в результате обработки пакета термограмм было обнаружено, что в месте соединения двух элементов имеется тепловая аномалия. Это свидетельствует о том, что в этом месте вероятно идет саморазогрев материала, и под поверхностью происходит зарождение дефекта, который в скором времени должен будет выйти на поверхность. Таким образом, данный участок конструкции требует дополнительного внимания при будущих обследованиях.



а) *б*)

Рис. 5. Результаты инфракрасной съёмки:
а — сварной шов без видимых усталостных повреждений;
б — изображение носка сварного шва, построенное по значениям матрицы *B*

Обсуждение и заключения. Проведенные работы на пролетных строениях показали эффективность автокорреляционной ИК-термографии как метода бесконтактной диагностики. Показана работоспособность метода на реальных объектах, находящихся под случайной нагрузкой. Имело место соответствие изменения напряжений в конструкции с изменением регистрируемой температуры. Проведена диагностика некоторых известных дефектов, на которых было отмечено продолжающееся развитие повреждений, что в последствии

подтвердилось повторными обследованиями этих элементов конструкций. Кроме этого, выявлен случай саморазогрева во внешне бездефектной зоне, что указывает на вероятный процесс зарождения дефекта, который на момент съемки не мог быть однозначно диагностирован другими методами. Это свидетельствует о том, что данный участок требует дополнительного наблюдения. При условии обнаружения дефекта на этом участке в процессе последующих наблюдений можно говорить о возможности использования ИК-термографии для выявления скрытых дефектов и прогнозирования их появления.

Список литературы

1. Соловьев, Л. Ю. Новые технологии в обследовании мостов / Л. Ю. Соловьев, А. Л. Соловьев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 3 (54). — С. 14–20.

2. Vavilov, V. Infrared thermography and thermal nondestructive testing / V. Vavilov, D. Burleigh. — Cham : Springer, 2020. — 598 p.

3. Pitarresi, G. Quantitative thermoelastic stress analysis by means of low-cost setups / G. Pitarresi, R. Cappello, G. Catalanotti // Optics and Lasers in Engineering. — 2020. — Vol. 134. — Art. 106158. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106158

4. Breitenstein, O. Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials / O. Breitenstein, W. Warta, M. C. Schubert. — Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2018. — 342 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99825-1

5. Boccardi, S. Infrared thermography to monitoring mechanical tests on composite materials: Experimental procedure and data analysis / S. Boccardi // University of Naples Federico II, 2017. — 168 p. https://doi.org/10.6093/UNINA%2FFEDOA%2F11750

6. Antolis, C. Optical Lock-in Thermography for Structural Health Monitoring – A Study into Infrared Detector Performance / C. Antolis, N. Rajic // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 188. — P. 471–478. https://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.510

7. Thermoelastic Stress Analysis and Dissipated Energy Evaluation Using Infrared-Optical Synchronous Measurement / D. Shiozawa, Y. Uchida, Kazuki Kobayashi [et al.]. — In: Proc. 15th Int. Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications. — 2019. — Vol. 27. https://doi.org/10.3390/proceedings2019027050

8. Energy Dissipation Measurement in Improved Spatial Resolution Under Fatigue Loading / A. Akai, D. Shiozawa, T. Yamada, T. Sakagami // Experimental Mechanics. — 2020. — Vol. 60. — P. 181–189. https://dx.doi.org/10.1007/s11340-019-00552-w

9. Sieber, L. Crack-Detection in old riveted steel bridge structures / L. Sieber, R. Urbanek, J. Bär // Procedia Structural Integrity. — 2019. — Vol. 17. — P. 339–346. https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2019.08.045

10. Chase, S. Evaluation of fatigue-prone details using a low-cost thermoelastic stress analysis system / S. Chase, Y. Adu-Gyamfi. — Virginia Transportation Research Council, 2016. — 53 p.

11. Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components / F. Ciampa, P. Mahmoodi, F. Pinto, M. Meo // Sensors. — 2018. — Vol. 18. — Art. 609. https://doi.org/10.3390/s18020609

12. Oswald-Tranta, B. Lock-in inductive thermography for surface crack detection in different metals / B. Oswald-Tranta // Quantitative InfraRed Thermography Journal. — 2019. — Vol. 16. — P. 276–300. https://doi.org/10.1080/17686733.2019.1592391

13. Вавилов, В. П. Тепловизоры и их применения / В. П. Вавилов, А. Г. Климов. — Москва : Интел универсал, 2002. — 87 с.

14. Куриленко, Г. А. Исследование повреждаемости металлов термодинамическим способом / Г. А. Куриленко // Известия Томского политехнического университета. — 2015. — Т. 326, № 3. — С. 105–109.

15. Boyce, B. R. Thermoelastic Measurement Techniques Enabled by Self-reference / B. R. Boyce, J. R. Lesniak // Residual Stress, Thermomechanics & Infrared Imaging, Hybrid Techniques and Inverse Problems. — 2019. — Vol. 7. — P. 125–127. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95074-7_24

16. Izumi, Y. Accuracy improvement of self-reference lock-in thermography method and its application to detection of fatigue cracks in steel bridges / Y. Izumi, T. Sakagami, S. Kubo // In: Proc. SPIE Conf. on Defense, Security, and Sensing, 2010. — Vol. 7661. https://doi.org/10.1117/12.852961

Поступила в редакцию 22.02.2022
Поступила после рецензирования 06.04.2022
Принята к публикации 07.04.2022

Об авторах:

Соловьев Александр Леонидович, инженер Сибирского научно-исследовательского института Мостов Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, РФ, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), ORCID, Alsolovyov1337@gmail.com.

Рояк Михаил Эммануилович, профессор кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета (630073, РФ, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20), доктор технических наук, ScopusID, ResearcherID, ORCID, mikeroyak@gmail.com.

Заявленный вклад авторов:

А. Л. Соловьев — разработка и отладка алгоритмической части, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; М. Э. Рояк — научное руководство, анализ результатов расчетов, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.